



**Modèle de formation du gisement d'argent d'Imiter (Anti-Atlas oriental, Maroc). Nouveaux apports de l'analyse structurale et minéralogique. Model of formation of the Imiter silver deposit (eastern Anti-Atlas, Morocco). New structural and mineralogical constraints .**

Johann Tuduri, Alain Chauvet, Aomar Ennaciri, Luc Barbanson

► **To cite this version:**

Johann Tuduri, Alain Chauvet, Aomar Ennaciri, Luc Barbanson. Modèle de formation du gisement d'argent d'Imiter (Anti-Atlas oriental, Maroc). Nouveaux apports de l'analyse structurale et minéralogique. Model of formation of the Imiter silver deposit (eastern Anti-Atlas, Morocco). New structural and mineralogical constraints .. Comptes Rendus Géoscience, 2006, 338, pp.4, 253-261. 10.1016/j.crte.2005.11.010 . hal-00023638

**HAL Id: hal-00023638**

**<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/hal-00023638>**

Submitted on 30 May 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **Modèle de formation du gisement d'argent d'Imiter (Anti-Atlas oriental, Maroc). Nouveaux apports de l'analyse structurale et minéralogique**

## **Model of formation of the Imiter silver deposit (eastern Anti-Atlas, Morocco). New structural and mineralogical constraints**

**Johann Tuduri<sup>a</sup>, Alain Chauvet<sup>b</sup>, Aomar Ennaciri<sup>c</sup> and Luc Barbanson<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>ISTO, UMR 6113, université d'Orléans, BP 6759, 45067 Orléans cedex 2, France*

*<sup>b</sup>Laboratoire de dynamique de la lithosphère, UMR 5573, Isteem, université Montpellier-2, CC 60, 34095 Montpellier cedex 5, France*

*<sup>c</sup>Société métallurgique d'Imiter (SMI), mine d'Imiter, BP 30, Tinghir, Maroc*

### **Abstract**

Based on a combined geometrical and mineralogical analysis, a three-stage model of formation of the mineralized veins of the giant Imiter silver deposit (Anti-Atlas, Morocco) is herein proposed. A first episode is characterized by the development of quartz, pink dolomite and Ag-rich minerals veins formed during a dextral transpressive event. The second episode is associated with a normal left-lateral motion that re-opens previous structures, filled by pink dolomite gangue. Alteration stages contribute to a local Ag enrichment.

**Keywords:** Morocco; Eastern Anti-Atlas; Imiter; Silver; Veins; Transpression; Structural control

### **Résumé**

Basé sur l'étude de nouvelles données géométriques et minéralogiques, un modèle de formation en trois stades des veines du gisement d'argent d'Imiter (Anti-Atlas oriental, Maroc) est proposé. Le premier stade est caractérisé par le développement des veines les plus riches, à remplissage de quartz puis dolomite rose, dans un contexte transpressif dextre associé à une direction de raccourcissement NW–SE à WNW–ESE. Le second stade, à remplissage de dolomite rose, est associé à un cisaillement senestre normal, contrôlé par une direction de raccourcissement nord–sud, réutilisant certaines des structures du stade 1. Des phénomènes d'altération contribuent à un enrichissement local en Ag.

**Mots-clés:** Maroc; Anti-Atlas oriental; Imiter; Argent; Veines; Transpression; Contrôle structural

# Abridged English version

## 1. Introduction and geological setting

The world-class Imiter silver mine (ca. 8.5 Mt at 700 g/t) is located on the northern side of the Precambrian Jbel Saghro inlier (eastern Anti-Atlas, Morocco, Fig. 1a), north of the West African Craton [3], [5], [8] and [9]. Two major lithostructural units are recognized [18]: (i) the lower complex made of Middle Neoproterozoic detrital sediments [7] and [17] intruded by ca. 570–580 Ma diorite and granodiorite plutons [2] and [4] and (ii) the upper complex composed by lava flows and ash-flow tuffs associated with cogenetic granites [1], [2], [6], [10] and [15] dated at  $550 \pm 3$  Ma (U/Pb on zircons, [2]). The Imiter deposit, localized along N070–090°E-trending regional faults system is assumed to be a Late Neoproterozoic epithermal deposit, hosted by both lower and upper complexes [11], [12] and [16]. The ore deposition is genetically associated with the felsic volcanic event, dated at 550 Ma, and assumed to result from a regional extensional tectonic regime [2], [11], [12], [13] and [16].

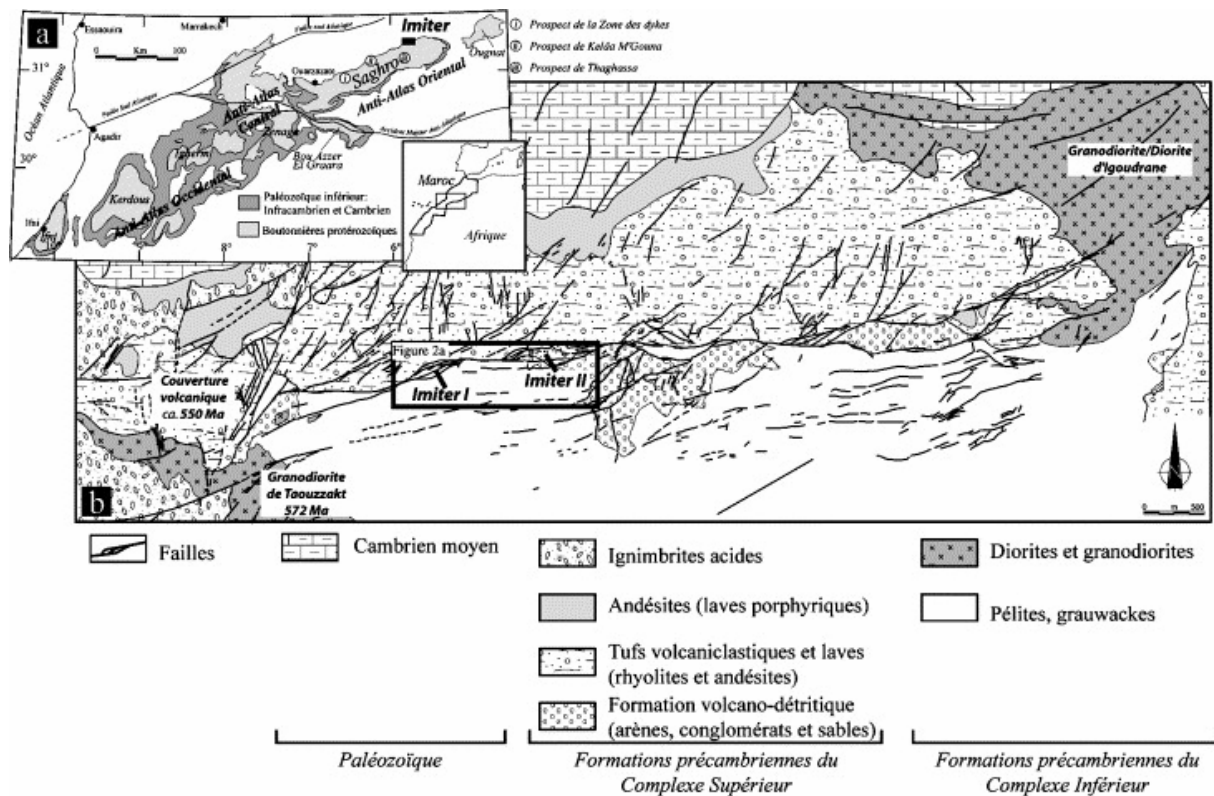


Fig. 1. (a) Représentation schématique de l'Anti-Atlas marocain et localisation de la mine d'Imiter et des autres indices minéralisés du Jbel Saghro. (b) Carte géologique simplifiée du gisement d'Imiter (d'après documents SMI).

(a) Schematic map of the Moroccan Anti-Atlas and localization of the Imiter silver mine and other mineral-bearing indices of the Jbel Saghro. (b) Simplified geological map of the Imiter silver mine (modified according to SMI documents).

Based on structural, geometrical and mineralogical constraints, we propose a re-examination of the model of formation and discuss the structural control of the Imiter silver-bearing veins.

## 2. Structural sketch

Mineralization is mainly found within the lower complex metasediments, made of greywacke and black-shale [17]. These rocks are unconformably overlain by the upper complex volcanic sequences that mainly consists of reworked tuffs, conglomerates, lava flows and ash flow tuffs generally felsic in composition. Cambrian sediments overlie these formations towards the north (Fig. 1b).

The Imiter fault system, 10-km long, is localized at the contact between lower and upper complexes (Fig. 1b). It consists in the association between N090°E and N060–070°E faults that define a succession of apparent left-lateral pull-apart texture, at map scale (Fig. 1 and Fig. 2). In exploration galleries (Imiter I and II), a similar geometry is recognized (Fig. 2b). At Imiter I, for example, three structures are observed with various dipping: F<sub>0</sub>, F<sub>0</sub> north and F<sub>0</sub> south (Fig. 2 and Fig. 3). The main F<sub>0</sub> structure is oriented N090°E 75–90°N, whereas secondary ones, F<sub>0</sub> north and F<sub>0</sub> south, trend N070–080°E 80°NW and N065°E 50°SE, respectively. With depth, the F<sub>0</sub> south structure tends to be at low angle (Fig. 3). At Imiter II, three structures are exploited: R<sub>7</sub>, R<sub>6</sub> and B<sub>3</sub> (Fig. 2b). The main B<sub>3</sub> structure displays the same features as the F<sub>0</sub> structure. The R<sub>7</sub> and R<sub>6</sub> secondary ones are listric and both oriented N065°E with a south dipping. Here also, structures tend to be less vertical with depth (Fig. 2 and Fig. 3).

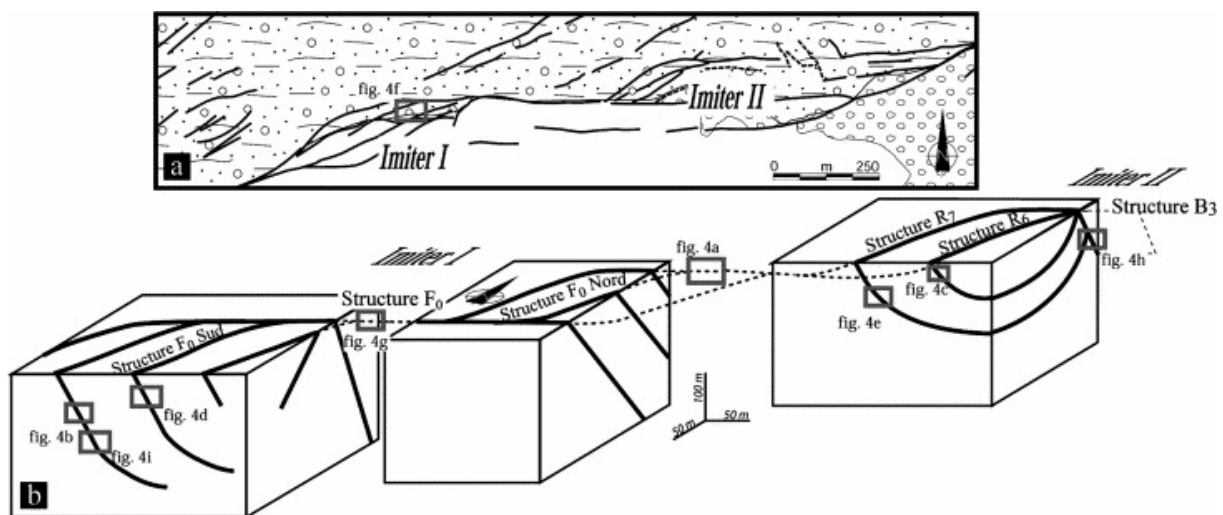


Fig. 2. (a) Schéma structural du gisement des secteurs d'Imiter I et II (même légende que Fig. 1b). (b) Bloc-diagramme synthétique montrant la géométrie des principales structures minéralisées (F<sub>0</sub> sud, F<sub>0</sub>, F<sub>0</sub> nord, R<sub>7</sub>, R<sub>6</sub> et B<sub>3</sub>) observées en galerie. La localisation des photographies de la Fig. 4 est indiquée.

(a) Structural sketch of the Imiter I and II areas (same legend that Fig. 1b). (b) Block-diagram showing the geometry of the main ore-bearing structures (F<sub>0</sub> south, F<sub>0</sub>, F<sub>0</sub> north, R<sub>7</sub>, R<sub>6</sub>, and B<sub>3</sub>) observed in gallery. The localization of photographs of Fig. 4 is indicated.

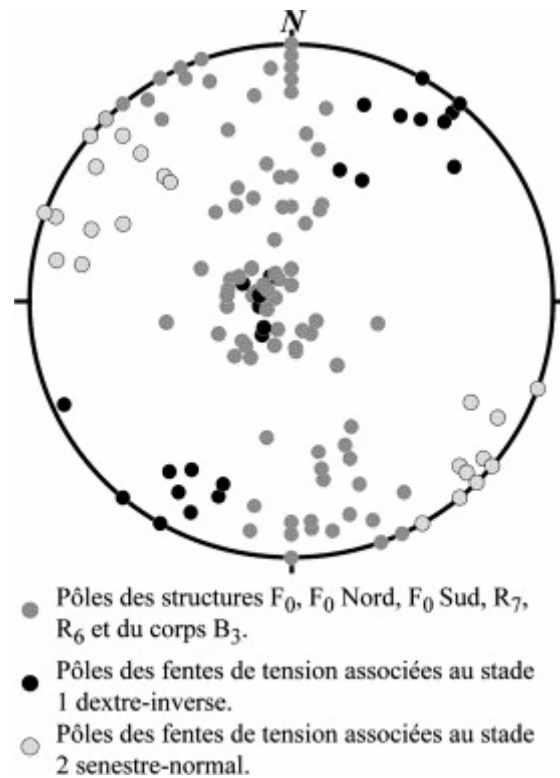


Fig. 3. Diagramme stéréographique représentant les variations de pendage de l'ensemble des structures de la mine d'Imiter (diagramme de Schmidt, hémisphère inférieur).

Stereonet diagram (Schmidt diagram, lower hemisphere) showing the dip variations of the entire Imiter vein system.

### 3. Geometry and filling of mineralized veins

In order to better understand vein formation process, we concentrate our analysis on the relations between ore-body geometry and internal filling. Three stages have been determined.

#### 3.1. The quartz $\pm$ pink dolomite dextral-reverse stage 1

This stage, also observed within the main F<sub>0</sub> and B<sub>3</sub> structures, is rather developed within the secondary structures (F<sub>0</sub> north, F<sub>0</sub> south, R<sub>6</sub> and R<sub>7</sub>). Because of specific geometry, filling is assumed to carry out in voids that result from a right-lateral shearing (Fig. 4a), whereas reversal motions are at the origin of voids opening in the vertical planes (Fig. 4b and c). NW–SE tension-gashes are observed and also result from a right-lateral shearing (Fig. 3). Quartz and pink dolomite are the main filling phases whereas ore is mainly constituted by Ag–Hg amalgam and grey copper, galena and polybasite–pearceite. Along the south dipping structure (F<sub>0</sub> south, R<sub>6</sub> and R<sub>7</sub>) large open vacuums are observed (Fig. 4b), because of important dissolution linked with alteration. When preserved, veins are filled by breccia-like ore with host-rocks fragments and quartz-rich matrix (Fig. 4d). The formation of flat-lying veins is also controlled by thrust-like motion (Fig. 4e and f). Pink dolomite is observed as late filling phase.



Fig. 4. (a) Vue en couronne des structures du stade 1. Les *pull-aparts* et les fentes de tension à remplissage géodique de quartz montrent une cinématique dextre, structure F<sub>0</sub> nord, Imiter I. (b) Structures en *pull-apart* de la F<sub>0</sub> sud, fortement affectées par le stade d'altération entraînant la dissolution du remplissage primaire et la formation d'une cavité (stade 1). L'ouverture de la structure répond à une cinématique chevauchante à vergence nord-ouest-NNW. (c) *Pull-apart* à remplissage de quartz et *boxwork* de dolomite rose du stade 1, montrant un cisaillement inverse vers le sud, structure R<sub>6</sub>, Imiter II. (d) Brèche à ciment de quartz, puis dolomite rose altérée du stade 1 et minéralisation argentifère (galène, amalgame Ag-Hg, cuivre gris), rencontrée dans les structures en *pull-apart* de la structure F<sub>0</sub> sud, Imiter I. Voir la localisation sur la Fig. 4b. (e) Structure plate à remplissage de quartz bréchique puis dolomite rose contrôlée par un jeu chevauchant à vergence ouest-NW, base de la structure

R<sub>7</sub>, Imiter II. **(f)** Veines plates associées à une faille inverse, localisées dans des tufs volcaniques andésitiques, Grande Carrière, Imiter I. **(g)** Vue en couronne de fentes de tension et structures en *pull-apart* à remplissage de dolomite rose à cinématique senestre, structure F<sub>0</sub>, Imiter I (stade 2). **(h)** Cisaillement en faille normale à remplissage de dolomite rose du stade 2, structure B<sub>3</sub>, Imiter III. **(i)** Stade d'altération générant des figures de dissolution sur un échantillon provenant de la structure F<sub>0</sub> sud. Seul le quartz n'a pas été dissout, les vides étant interprétés comme des *boxworks* de dolomite rose. Les photographies **a** et **g** ont été prises en couronnes dans les galeries exploitées de la mine d'Imiter ; l'interprétation cinématique doit donc être inversée.

**(a)** Stage-1 pull-apart and tension-gashes structures filled by geodic quartz and formed during dextral kinematics, F<sub>0</sub> north structure, view realized towards the top of mining gallery, Imiter I. **(b)** Pull-apart of stage 1, indicator of a reverse shearing towards the south and showing void formations, structure R<sub>6</sub>, Imiter II. **(c)** Pull-apart texture of the F<sub>0</sub> south structure, thrusting towards the northwest–NNW. The filling is composed by quartz (stage 1). **(d)** Quartz breccias followed by pink dolomite of stage 1 and silver-bearing ore (galena, Ag—Hg amalgam, grey copper) observed within pull-apart of the F<sub>0</sub> south structure, Imiter I. See location in Fig. 4b. **(e)** Reverse flat-lying mineralized vein filled by stage 1-related minerals likely quartz breccias and pink dolomite, structure R<sub>7</sub>, Imiter II. **(f)** Flat-lying veins associated with reverse fault and hosted by andesitic sandstone, large open pit, Imiter I. **(g)** Tension gashes and sinistral pull-apart structures filled with pink dolomite of the stage 2, F<sub>0</sub> structure, Imiter I. **(h)** Normal shearing vein filled by pink dolomite of the stage 2, B<sub>3</sub> structure, Imiter II. **(i)** Alteration stage assumed to create dissolution textures on a sample from the F<sub>0</sub> south structure. Only quartz was preserved, the vacuums being interpreted as pink dolomite boxworks. Because photographs **a** and **g** were taken towards the top of exploration galleries, kinematics interpretation must be inverted.

### 3.2. The pink dolomite sinistral stage 2

Mainly along the F<sub>0</sub> and B<sub>3</sub> structures, massive pink dolomite veins that display left-lateral pull-apart textures and NE–SW tension-gashes are observed (Fig. 3 and Fig. 4g). A normal component is observed in the vertical plane (Fig. 4h). This event appears fairly developed within secondary structures (F<sub>0</sub> north, F<sub>0</sub> south, R<sub>6</sub> and R<sub>7</sub>).

### 3.3. The alteration stage(s) 3

Important alteration stages are assumed to create dissolution textures within the larger structures of the F<sub>0</sub> south, F<sub>0</sub> north, R<sub>6</sub> and R<sub>7</sub> structures. Only quartz was preserved, the vacuums being interpreted like pinky dolomite boxworks. These stages are assumed to produce native silver deposition.

## 4. Discussion

### 4.1. Model of formation of the Imiter veins system

A three-stage model of formation, explaining structural control and vein formation of the Imiter mine is herein proposed (Fig. 5). The first stage (Fig. 5a) is assumed to control east–west dextral shear-zones and subsequent ENE to northeast transpressive relays that develop thrusts within secondary structures (F<sub>0</sub> south, F<sub>0</sub> north, R<sub>6</sub> and R<sub>7</sub>). This dextral stage I, developing quartz ± pink dolomite veins, occurs under the effect of WNW–ESE direction of shortening. The low-angle dipping of the deeper structures represents the base of transpressive oversteps [14].

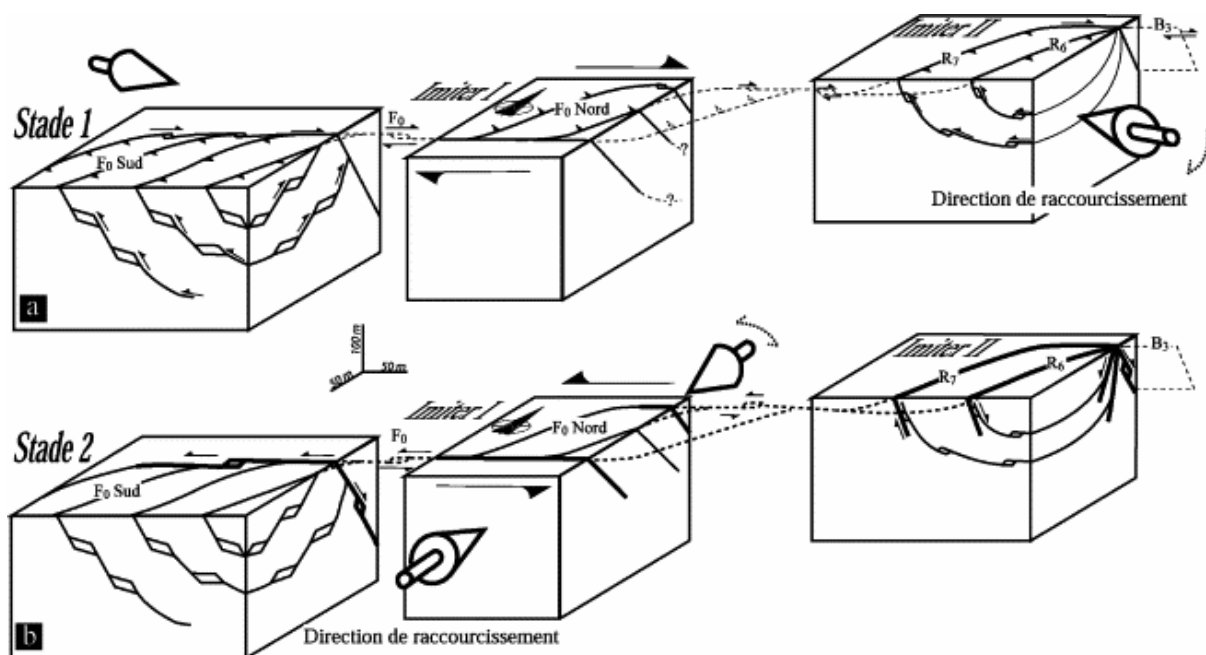


Fig. 5. Modèle d'évolution expliquant la formation des veines minéralisées de la mine d'Imiter. **(a)** Stade 1 dextre, associé à la mise en place des veines à quartz et dolomie rose sous les effets d'une direction de raccourcissement WNW–ESE. La formation des chevauchements associés, le long des structures annexes  $F_0$  sud,  $F_0$  nord,  $R_6$  et  $R_7$ , se réalise au cœur des relais transpressifs. **(b)** Stade 2 senestre normal, à remplissage de dolomite rose, rouvrant et réutilisant les structures précédentes. Le stade 2 affecte principalement les structures primaires  $F_0$  et  $B_3$ . Le troisième stade d'altération n'est pas représenté.

Interpretative block diagram explaining the formation of the main ore-bearing veins of the Imiter silver mine. **(a)** Dextral stage 1 developing quartz ± pink dolomite veins under the effect of WNW–ESE direction of shortening. The formation of subsequent thrusts ( $F_0$  south,  $F_0$  north,  $R_6$  and  $R_7$ ) occurs within transpressive pull apart. **(b)** Sinistral normal stage 2 related to pink dolomite veining that re-opened and re-used the previously formed structures. Note that stage 2 mainly affects the primary structures  $F_0$  and  $B_3$ . Alteration-type stage 3 is not represented.

The pink dolomite-rich second stage (Fig. 5b) re-opened and re-used the main structures of the stage 1 ( $F_0$  and  $B_3$ ) with left-lateral motion and normal component under the effects of ca. north–south direction of shortening. Secondary structures could thus behave out of transtensive relays.

The third stage is responsible for the development of an intense alteration that contributes to some local enrichments of Ag.

## 5. Conclusions

We propose an integrated model that explains the formation of all the mineralized veins in the mining area. In addition to normal and left-lateral faulting, already characterized by previous works [2], [12] and [15], our combined approach highlights an earlier mineralized stage in the metallogenic history of the Imiter silver mine, responsible for the formation of economic structures ( $F_0$  south,  $F_0$  north,  $R_6$  and  $R_7$ ). This stage can be correlated with the main mineralized event that affects the entire Saghro, and that creates the gold-bearing indices of Thagghassa, Kelâa M'Gouna and of Zone des Dykes (Fig. 1a, [18], [19], [20] and [21]), mainly because all form under the control of NW–SE to WNW–ESE-trending shortening direction



and are associated with the Late Neoproterozoic felsic volcanism of the upper complex recognized on the whole of the Saghro area [2], [13] and [18].

# 1. Introduction et cadre géologique

Le gisement d'argent d'Imiter, de classe mondiale (ca. 8.5 Mt à  $700 \text{ g t}^{-1}$ ), est localisé sur le flanc nord de la boutonnière précambrienne du Jbel Saghro (Anti-Atlas oriental, Maroc, [Fig. 1a](#)), qui constitue, avec d'autres boutonnières (Kerdous, Bou Azzer, Siroua...), le rebord septentrional du craton Ouest-Africain [\[3\]](#), [\[5\]](#), [\[8\]](#) and [\[9\]](#). Deux grandes unités lithostructurales sont reconnues dans le Jbel Saghro [\[18\]](#) : (i) un complexe inférieur, réputé d'âge Néoprotérozoïque moyen [\[7\]](#) and [\[17\]](#), constitué de pélites et de grauweekes intrudées par des plutons de diorites et de granodiorites datées à ca. 565–580 Ma [\[2\]](#) and [\[4\]](#) et (ii) un complexe supérieur constitué de formations volcaniques et volcanoclastiques cogénétiques de granites [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[6\]](#), [\[10\]](#) and [\[15\]](#) datés du Néoprotérozoïque supérieur à **550 ± 3 Ma**(U/Pb sur zircons [\[2\]](#)).

Le gisement d'Imiter est formé de veines épithermales encaissées dans les formations des complexes inférieur gréso-pélique et supérieur volcanique [\[11\]](#) and [\[12\]](#). Il est localisé sur un important faisceau de failles d'échelle régionale, orientées ca. N070°E à N090°E ([Fig. 1b](#)). Les précédentes études structurales, basées sur l'analyse des populations de failles, ont conclu à l'existence de deux événements tectoniques majeurs qui contrôlent la formation des veines qui composent le gisement [\[12\]](#) and [\[16\]](#) : (i) le premier stade, associé à une tectonique extensive NNW–SSE à nord–sud, développe les veines quartzeuses ; (ii) le second, contrôlé par une tectonique décrochante senestre, est caractérisé par la formation de veines à gangue essentiellement dolomitique. D'après ces travaux, ces deux événements sont porteurs de la minéralisation, principalement composée d'amalgame Ag—Hg, de sulfosels d'Ag, d'arsénopyrite et de sulfures à métaux de base [\[2\]](#). Des travaux récents ont montré que la minéralisation argentifère était génétiquement associée au volcanisme felsique daté à **550 ± 3 Ma**(c'est-à-dire Néoprotérozoïque supérieur) [\[2\]](#), [\[12\]](#) and [\[13\]](#).

Notre travail, basé sur l'étude structurale, géométrique et minéralogique des veines argentifères de la mine d'Imiter, propose de réexaminer le modèle de formation et le contrôle structural des minéralisations d'Imiter.

## 2. Schéma structural

Les sédiments du complexe inférieur de la boutonnière d'Imiter, composés d'alternances de séquences grauweekeuses et de pélites sombres, encaissent l'essentiel de la minéralisation [\[17\]](#). Ces formations sont intrudées par deux corps plutoniques : la granodiorite de Taouzzakt, au sud-ouest, datée à **572 ± 5 Ma**(U/Pb sur zircons, [\[2\]](#)) et la diorite d'Igoudrane au nord-est, dont l'âge reste incertain ([Fig. 1b](#)). Ces unités du complexe inférieur sont recouvertes en discordance par les formations du complexe supérieur, puissantes de quelques centaines de mètres, sub-tabulaires, accusant un léger pendage vers le nord-ouest. Cette série est construite par l'empilement de nombreux niveaux de tufs volcaniques, conglomérats volcano-sédimentaires, ignimbrites acides et laves (épanchements, dômes et dykes), de nature andésitique à rhyolitique ([Fig. 1b](#)). L'ensemble de ces formations est recouvert vers le nord par les premiers sédiments attribués au Cambrien moyen ([Fig. 1b](#)).

Le faisceau de failles d'Imiter, long d'une dizaine de kilomètres, est localisé le long du contact entre le complexe inférieur et le complexe supérieur ([Fig. 1b](#)). Il s'agit d'un système de failles

principalement orientées N090°E, avec de nombreux relais orientés N060 à 070°E et décrivant, à l'échelle cartographique, une succession de *pull-apart* dont la cinématique d'ouverture apparente serait senestre (Fig. 1 and Fig. 2). Dans le secteur minier, la faille d'Imiter montre de nombreuses évidences de failles normales qui séparent et décalent un compartiment nord, composé de roches volcaniques, d'un compartiment sud, essentiellement constitué par les formations du complexe inférieur. Le décalage vertical observé à partir des relevés miniers est estimé à ca. 400 m. D'autres évidences de failles normales ont également été observées plus à l'est, dans le secteur d'Igoudrane (Fig. 1b), où les formations du Paléozoïque sont effondrées et décalées par une tectonique extensive sur plusieurs dizaines de mètres.

En galeries (Imiter I et Imiter II), la géométrie en *pull-apart* est également observée (Fig. 2b). À Imiter I, trois structures sont actuellement exploitées : F<sub>0</sub>, F<sub>0</sub> nord et F<sub>0</sub> sud (Fig. 2b). Ces structures sont orientées est-ouest à ENE-WSW et présentent des pendages variables (Fig. 3). La structure F<sub>0</sub>, assimilée à la structure principale, est parallèle au faisceau de failles et est orientée N090°E. Elle présente un fort pendage vers le nord (75 à 90°). La structure annexe F<sub>0</sub> nord est orientée N070-080°E et présente également un fort pendage vers le nord-ouest (80°), tandis que la F<sub>0</sub> sud, orientée N065°E, présente un pendage vers le sud-est d'environ 50°. En profondeur, cette dernière structure tend à s'aplatir (ca. 30°, Fig. 3).

À Imiter II, trois structures sont également reconnues et exploitées : R<sub>7</sub>, R<sub>6</sub> et le corps B<sub>3</sub> (Fig. 2b). Elles montrent également des variations de pendage (Fig. 3). Le corps B<sub>3</sub> est formé d'un ensemble de structures présentant les mêmes caractéristiques que la structure F<sub>0</sub> et est assimilé à la structure majeure. Les structures annexes R<sub>6</sub> et R<sub>7</sub>, toutes les deux orientées N065°E et à fort pendage vers le sud (ca. 60°), montrent des pendages plus faibles (ca. 20-35°) dans les niveaux inférieurs (Fig. 2 and Fig. 3).

### 3. Étude des veines minéralisées : géométrie et remplissage

Plutôt que d'étudier la cinématique des failles, pouvant résulter de jeux et re-jeux tardifs, notre approche s'est concentrée sur l'analyse combinée des conditions d'ouverture déduites de la géométrie des corps minéralisés et de la minéralogie des remplissages. Trois stades ont été déterminés.

#### 3.1. Stade 1 : jeu dextre inverse à quartz ± dolomite

Ce stade est observé dans les deux structures principales (F<sub>0</sub> et B<sub>3</sub>) et surtout dans les structures annexes (F<sub>0</sub> nord, F<sub>0</sub> sud, R<sub>6</sub> et R<sub>7</sub>). Le long des structures F<sub>0</sub> et B<sub>3</sub>, des veines à remplissage de quartz, puis de dolomite rose, sont présentes en couronne et sur les fronts de taille des galeries d'exploitation. Le remplissage s'effectue dans des ouvertures en relais extensifs, qui résultent de jeux senestres, lorsque les structures sont observées en couronne (Fig. 4a), et de jeux inverses, dans les plans verticaux (Fig. 4b et c). Des fentes de tension orientées NW-SE (Fig. 3), associées à ces structures, résultent également d'une cinématique décrochante senestre observée en couronne.

Le long des structures à pendage sud, de larges cavités sont parfois observées (Fig. 4b), montrant que le remplissage principal a pu être altéré et dissous par les différents stades d'altération (cf. ci-dessous). Lorsque le remplissage principal est conservé, on note la présence de quartz, bréchifiant l'encaissant, associé au dépôt de l'amalgame Ag-Hg, de l'argentite, de la polybasite-pearcélite, des cuivres gris, d'argents rouges et de la galène, qui forment

l'essentiel de la paragenèse argentifère (Fig. 4d). La cristallisation de dolomite rose termine ce stade. Un remplissage semblable est observé dans les parties plates des structures R<sub>6</sub> et R<sub>7</sub>. La formation de ces veines plates (Fig. 4e), à quartz et dolomite rose, est également contrôlée par un jeu chevauchant, comme dans les parties plus redressées des structures annexes.

Un autre type de veines plates est présent et systématiquement situé à proximité de contacts chevauchants (Fig. 4f). Le remplissage montre des quartz fibreux ou prismatiques, de la chlorite et de la dolomite rose. Le développement de ces structures, assimilées à des fentes de tension (Fig. 3), est associé aux jeux des failles inverses voisines.

### 3.2. Stade 2 : jeu senestre normal à dolomite rose seule

Le long des structures principales F<sub>0</sub> et B<sub>3</sub>, de nombreuses veines à remplissage massif de dolomite rose sont observées. Ces remplissages s'effectuent dans des vides générés par de petits relais en *pull-apart* et des fentes de tensions orientées NE–SW (Fig. 3) résultant d'une cinématique décrochante dextre observée en couronne (Fig. 4g). Une composante normale est par ailleurs observée sur les fronts de taille (Fig. 4h).

À Imiter I, les structures annexes F<sub>0</sub> sud et F<sub>0</sub> nord ne sont pas affectées par ce second épisode. En revanche, à Imiter II, les structures annexes R<sub>6</sub> et R<sub>7</sub> ont pu être rouvertes ou simplement affectées par des jeux cisailants normaux.

### 3.3. Stade(s) 3 : Les altérations

Des stades d'altération récurrents, responsables de dissolutions et de néoformations minérales importantes au sein des structures les plus puissantes (Fig. 4b), sont observés sur l'ensemble de la mine, bien que surtout développés au cœur des structures annexes F<sub>0</sub> sud, F<sub>0</sub> nord, R<sub>6</sub> et R<sub>7</sub>, formées lors des stades antérieurs. L'altération se traduit par une dissolution intense des carbonates pouvant aller jusqu'à la formation de vide (Fig. 4b et i). Dans ces zones, des néoformations minérales sont observables et sont caractérisées principalement par des dépôts pulvérulents de couleur brunâtre d'oxydes de fer et la cristallisation d'argent natif.

## 4. Discussion

### 4.1. Modèle de formation du gisement d'argent d'Imiter

Un modèle de mise en place en trois stades, expliquant la majorité des structures minéralisées du gisement argentifère d'Imiter, est proposé (Fig. 5). Le stade 1 (Fig. 5a) correspond à la formation des zones de cisaillement est–ouest décrochantes dextres. La formation des zones chevauchantes (structures annexes) se fait dans des relais transpressifs ENE à nord-est, sous les effets d'une direction de raccourcissement orientée NW–SE à WNW–ESE. Les structures engendrées lors de ce stade servent de réceptacles aux fluides minéralisateurs et sont caractérisées par le dépôt d'une gangue essentiellement quartzreuse, suivi par la cristallisation de dolomite rose. Le pendage de plus en plus faible des structures transpressives (R<sub>6</sub>, R<sub>7</sub> et F<sub>0</sub> sud) est interprété comme le résultat de l'amortissement de ces structures en base de relais [14]. Le dépôt de l'essentiel de la minéralisation mercuro-argentifère d'Imiter est associé à ce premier stade. Parce que le stade majeur minéralisé a été associé aux manifestations volcano-plutoniques acides tardi-néoprotérozoïques aux alentours de **550 ± 3 Ma** [2] and [13], nous interprétons ce stade 1 comme contemporain de ce magmatisme.

Durant le second stade (Fig. 5b), ces structures sont rouvertes lors de la reprise des *shear-zones* principales du stade 1 ( $F_0$  et  $B_3$ ), en cisaillement senestre à composante normale, sous les effets d'une direction de raccourcissement orientée  $\sim$ nord-sud. Les structures annexes  $R_6$  et  $R_7$  pourraient ainsi se comporter en relais transtensifs, comme le suggèrent les évidences de jeux normaux observés sur ces dernières ( $R_6$  et  $R_7$ ). Ces réouvertures sont associées à un remplissage de nature dolomitique. Ce second stade, pourtant bien représenté dans la mine, ne semble pas être d'importance économique. Du fait de son caractère sécant sur l'ensemble des formations précambriennes, sa mise en place pourrait être attribuée à des événements tectoniques plus récents.

Le stade 3, correspondant aux phénomènes d'altérations, se développe tardivement et en tous cas, postérieurement à l'épisode minéralisateur 1. Il contribue à un enrichissement local en Ag.

## 4.2. Conclusions

Nous proposons un modèle en trois stades qui explique la formation de l'ensemble des veines minéralisées de la mine d'Imiter. En plus des jeux normaux et senestres, déjà identifiés par les travaux précédents [2], [12] and [15], notre approche a permis de mettre en évidence l'existence d'un épisode minéralisateur précoce (stade 1) dans l'histoire métallogénique d'Imiter. Nous interprétons cet épisode précoce, responsable de la formation des structures les plus riches (structures  $F_0$  sud,  $F_0$  nord,  $R_6$  et  $R_7$ ), comme contemporain de l'épisode minéralisateur majeur qui affecte l'ensemble du Saghro et qui crée les indices aurifères de Thaghassa, Kelâa et de la Zone des Dykes (Fig. 1a) [18], [19], [20] and [21]. Cette interprétation est basée sur deux arguments : (i) toutes ces minéralisations résultent d'un événement structural contrôlé par une direction de raccourcissement NW-SE à WNW-ESE [18], (ii) elles sont toutes également associées au volcanisme felsique tardi-néoprotérozoïque du complexe supérieur, reconnu sur l'ensemble de la boutonnière [2], [13] and [18]. Afin d'affiner ce modèle, il reste à (i) caractériser les fluides minéralisateurs des stades 1 et 2, (ii) caractériser la minéralogie du stade d'altération, (iii) comprendre les mécanismes de formation et surtout (iv) dater ces phénomènes. Des travaux en cours, essentiellement basés sur la minéralogie et l'étude des inclusions fluides, tenteront de répondre à ces questions. Néanmoins, nos travaux ont permis de réinterpréter le contrôle structural de la minéralisation argentifère d'Imiter, en démontrant l'intérêt de l'analyse combinée de la géométrie et des remplissages dans la compréhension des processus de formation des veines minéralisées.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'Action intégrée franco-marocaine n°222/STU/00. Nous remercions la société Reminex et la Société métallurgique d'Imiter (SMI) pour leur soutien financier et leur support logistique. Nous remercions en particulier M. Machaa, El Hajj Bouiroukouten, A. Saquaque et M. Mellal pour leur aide précieuse et sans faille.

## References

- [1] M. Benharref, Le Précambrien de la boutonnière d'El Kelaa des M'Gouna (Saghro, Anti-Atlas, Maroc). Pétrographie et structures de l'ensemble, *Implications lithostratigraphiques et géodynamiques*, université Cadi-Ayyad, Marrakech, Maroc (1991), p. 270.
- [2] A. Cheilletz, G. Levresse, D. Gasquet, M.R. Azizi-Samir, R. Zyadi, A.D. Archibald and E. Farrar, The giant Imiter silver deposit: Neoproterozoic epithermal mineralization in the Anti-Atlas, Morocco, *Miner. Deposita* **37** (2002), pp. 772–781.
- [3] G. Choubert and A. Faure-Muret, 1. Anti-Atlas (Morocco), *Earth-Sci. Rev.* **16** (1980), pp. 87–113.
- [4] H. De Wall, B. Kober, E. Errami, N. Ennih, R.O. Greiling, Âge de mise en place et contexte géologique des granitoïdes de la boutonnière d'Imiter (Saghro oriental, Anti-Atlas, Maroc), in : 2<sup>e</sup> Colloque international 3MA (Magmatisme, Métamorphisme & Minéralisations associées), Marrakech, Maroc, 2001.
- [5] N. Ennih and J.-P. Liégeois, The Moroccan Anti-Atlas: the West African Craton passive margin with limited Pan-African activity. Implications for the northern limit of the craton, *Precambrian Res.* **112** (2001), pp. 289–302.
- [6] E. Fauvelet and J. Hindermeyer, Note préliminaire sur les granites associés à des coulées rhyolitiques au Sud de Ouarzazate (Anti-Atlas central) et dans le Sarho, *C. R. Acad. Sci. Paris* **234** (1952), pp. 2626–2628.
- [7] A. Fekkak, A. Pouclet, H. Ouguir, H. Ouazzani, L. Badra and D. Gasquet, Géochimie et signification géotectonique des volcanites du Cryogénien inférieur du Saghro (Anti-Atlas oriental, Maroc), *Geodin. Acta* **13** (2001), pp. 1–13.
- [8] K.P. Hefferan, H. Admou, J.A. Karson and A. Saquaque, Anti-Atlas (Morocco) role in Neoproterozoic western Gondwana reconstruction, *Precambrian Res.* **103** (2000), pp. 89–96.
- [9] K.P. Hefferan, H. Admou, R. Hilal, J.A. Karson, A. Saquaque, T. Juteau, M.M. Bohn, S.D. Samson and J.M. Kornprobst, Proterozoic blueschist-bearing melange in the Anti-Atlas Mountains, Morocco, *Precambrian Res.* **118** (2002) (3–4), pp. 179–194.
- [10] J. Hindermeyer, Le Précambrien III du Saghro, *C. R. Acad. Sci. Paris* **237** (1953), pp. 1024–1026.
- [11] J.-M. Leistel and A. Qadrouci, Le gisement argentifère d'Imiter (Protérozoïque supérieur de l'Anti-Atlas, Maroc). Contrôles des mineralisations, hypothèses génétiques et perspectives pour l'exploration, *Chron. Rech. Min.* **502** (1991), pp. 5–22.
- [12] G. Levresse, Contribution à l'établissement d'un modèle génétique des gisements d'Imiter (Ag—Hg), Bou Madine (Pb—Zn—Cu—Ag—Au), Bou Azzer (Co, Ni, As, Au, Ag) dans l'Anti-Atlas marocain, Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy, France (2001) 218 p.

- [13] G. Levresse, A. Cheilletz, D. Gasquet, L. Reisberg, E. Deloule, B. Marty and K. Kyser, Osmium, sulphur, and helium isotopic results from the giant Neoproterozoic epithermal Imiter silver deposit, Morocco: evidence for a mantle source, *Chem. Geol.* **207** (2004) (1–2), pp. 59–79.
- [14] K. McClay and M. Bonora, Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems, *AAPG Bull.* **85** (2001) (2), pp. 233–260.
- [15] H. Ouguir, Contexte géologique du gisement argentifère d'Imiter (Anti-Atlas oriental, Maroc). Contrôle volcanique et structural de la mise en place des concentrations métalliques à Ag—Hg, université Cadi-Ayyad, Marrakech, Maroc (1997) 233 p.
- [16] H. Ouguir, J. Macaudière, G. Dagallier, A. Qadrouci and J.-M. Leistel, Cadre structural du gîte Ag—Hg d'Imiter (Anti-Atlas, Maroc) ; implication métallogénique, *Bull. Soc. géol. France* **165** (1994) (3), pp. 233–248.
- [17] H. Ouguir, J. Macaudière and G. Dagallier, Le Protérozoïque supérieur d'Imiter, Saghro oriental, Maroc : un contexte géodynamique d'arrière-arc, *J. Afr. Earth Sci.* **22** (1996) (2), pp. 173–189.
- [18] J. Tuduri, Processus de formation et relations spatio-temporelles des minéralisations à or et argent en contexte volcanique Précambrien (Jbel Saghro, Anti-Atlas, Maroc), in : Implications sur les relations déformation-magmatisme-volcanisme-hydrothermalisme, université d'Orléans, France, p. 428. : [http://hal.ccsd.cnrs.fr/view\\_by\\_stamp.php?label=ISTO&langue=fr&action\\_todo=view&id=te1-00008937&version=3](http://hal.ccsd.cnrs.fr/view_by_stamp.php?label=ISTO&langue=fr&action_todo=view&id=te1-00008937&version=3)
- [19] J. Tuduri, A. Chauvet, L. Barbanson, M. Labriki, L. Badra, Atypical gold mineralization within the Neoproterozoic of Morocco. Structural and mineralogical constraints from the Thaghassa prospect (Boumalne inlier, Jbel Saghro, Eastern Anti-Atlas), in: Proc. 7th biennial SGA Meeting, Mineral Exploration and Sustainable Development, Athens, Millpress, 2003.
- [20] J. Tuduri, J.-L. Bourdier, A. Chauvet, L. Barbanson, L. Badra, Evidence for a Late Precambrian ash-flow caldera: relationship with a hydrothermal Au—Ag system and structural control (Kelâa M'Gouna district, eastern Anti-Atlas, Morocco), in: 1st European Geosciences Union, Nice, 2004.
- [21] J. Tuduri, A. Chauvet, L. Barbanson, J.-L. Bourdier, M. Labriki, A. Ennaciri, C. Ennaciri-Leloix, L. Badra, Long-lived tectono-magmatic event and formation of the Au—Ag Jbel Saghro province during the Upper Neoproterozoic (Eastern Anti-Atlas, Morocco), in: 20th Colloquium of African Geology, Orléans, 2004.